

耗能梁配置方案对高强钢框架地震反应的影响

邓 露^{1,2}, 谢吴华¹, 柯 珂^{1,2}

(1. 湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082;

2. 湖南大学 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室, 长沙 410082)

摘 要: 为了研究基于耗能梁削弱的结构配置方案对配置耗能梁的高强钢框架结构的抗震性能和损伤控制效应的影响, 建立并验证了配置耗能梁的高强钢框架结构的“塑性铰-梁单元”数值模型, 通过配置不同削弱等级的耗能梁设计得到了具有不同屈服时序系数的3层及9层算例结构, 并进行非线性静力分析和地震时程分析。研究表明, 耗能梁削弱能够有效增大屈服时序系数, 其对结构的峰值变形影响相对有限, 而对震后残余变形影响显著。耗能梁的适度削弱将降低主体结构的塑性发展程度, 但过度削弱将加剧耗能梁的损伤发展以至于主体结构的塑性发展程度转而增长。最后, 提出了耗能梁削弱收益-损失评估的多性能指标, 并对3层及9层算例结构的耗能梁削弱等级提出了建议。

关键词: 耗能梁; 高强钢框架; 损伤控制效应; 屈服时序系数; 残余变形; 构件削弱; 收益-损失

中图分类号: TU 352.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2021)12-0016-07

DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.12.002

The Influence of EDB Arrangement on the Seismic Response of High-Strength Steel MRF

DENG Lu^{1,2}, XIE Wuhua¹, KE Ke^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Key Laboratory for Damage Diagnosis for Engineering Structures of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China)

DENG Lu; denglu@hnu.edu.cn

Abstract: To investigate the influence of the reduction-based energy dissipation beam (EDB) arrangement on the seismic performance and damage control effects of high-strength steel moment resisting frame (HSS-MRF) structure with EDB, a numerical model for HSS-MRF-EDB structure is proposed using plastic hinge and beam element. The EDB arrangements with different EDB reduction levels are conducted to obtain the different yielding sequence coefficients of 3-story and 9-story structure examples, and a pushover analysis and a seismic time-history analysis are performed. The results show that the EDB reduction can effectively increase the yielding sequence coefficients, but it has a limited effect on the peak deformation of structures and a significant effect on the residual deformation. The EDB reduction can reduce the plastic development of the main structure, but the excessive EDB reduction can accelerate the damage development of the EDB and cause the plastic development of the main structure to increase. Finally, the performance-indices for evaluating the gains-losses of the EDB reduction is proposed, and the recommended levels of the EDB reduction for the 3-story and 9-story structure examples are provided.

Keywords: energy dissipation beam (EDB); high-strength steel MRF; damage control effect; yielding sequence coefficient; residual deformation; component reduction; gains-losses

收稿日期: 2020-06-17; 收到修改稿日期: 2020-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(51708197)

作者简介:

邓 露(1984—), 男, 博士, 教授, 主要从事车桥耦合、装配式钢结构方面的研究。E-mail: denglu@hnu.edu.cn。

谢吴华(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事钢结构抗震方面的研究。

传统的抗震设计是在强震下通过结构的延性发展来平衡地震需求,在保障生命安全、结构抗倒塌以及经济性的同时,允许结构的主要抗侧力构件发展一定的塑性变形,导致结构构件产生损伤。地震作用后结构的残余变形显著、功能无法维持、恢复代价巨大^[1]。随着社会的高速发展,建筑物在遭受地震破坏后需要大规模修复甚至重建而造成的长时间功能丧失、运行中断,因而将导致相对于结构性破坏更为惨重的代价^[2]。近年来,“城市抗震韧性”概念受到越来越多的关注^[3-4]。“可恢复功能防震结构”已成为结构抗震设计中的一个重要理念,即结构在设防或罕遇水准地震作用后能够维持可接受的功能,不经修复或在部分使用状态下稍经修复即可恢复其使用功能^[1]。降低结构遭受地震破坏所产生的损伤和残余变形或改变损伤在结构体系中的分布模式是实现结构功能可恢复性的重要途径^[5]。MCCORMICK 等^[6]认为,当残余层间侧移角大于 0.5% 时,结构恢复代价将超过结构彻底重建的代价。

以可恢复和低残余变形为目标,国内外大量学者针对集中耗能、可更换构件的可恢复功能防震结构进行了研究。CONNOR 等^[7]提出了损伤控制结构的基本概念,损伤控制结构由主体结构和耗能结构组成,其中主体结构预期在地震作用下保持弹性,耗能结构集中损伤;VARGAS 等^[8-9]针对配置集中损伤的可更换或易于修复的结构“保险丝”的钢框架结构进行了设计与试验,实现了地震作用下结构保险丝耗散能量,钢框架梁柱构件保持弹性的可恢复性设计理念;李国强等^[10]提出了设置专门耗能装置的半刚性高强度钢框架设计概念,地震作用下耗能装置首先屈服并耗散地震能量,以避免高强度构件进入塑性状态。

陈以一等^[11]提出了配置耗能梁的高强度钢框架结构体系。在地震作用下耗能梁作为结构保险丝先行屈服并耗散能量,而高强度钢框架作为主体结构保持弹性。结构体系呈现耗能梁集中损伤、主体结构避免损伤的损伤控制效应。而充分发挥损伤控制效应的关键在于增强主体结构或削弱耗能梁以增大从耗能梁屈服到主体结构屈服之间的结构变形范围^[5],该变形范围的相对长度可由屈服时序系数(耗能梁与主体结构的屈服变形比)描述。以往针对该结构体系的研究^[12-13]主要通过增强主体结构来增大屈服时序系数,然而在实际结构中主体结构的设计需要综合考虑整体结构的基本抗震设计要求和工程应用的经济性,针对主体结构大幅度增强往往过于保守且具有局限性。相比之下,通过削弱耗能梁来增大屈服时序系数在结构设计的灵活性和经济性上更为合理。配置耗能梁的高强度钢框架结构设计中基于耗能梁削弱的结构配置方案亟待进一步研究。

基于此本文建立并验证了配置耗能梁(energy

dissipation beam, EDB) 的高强度钢框架结构的“塑性铰-梁单元”数值模型,通过配置不同削弱等级的耗能梁设计得到了具有不同屈服时序系数的 3 层及 9 层算例结构,并通过非线性静力分析和地震时程分析研究了基于耗能梁削弱的结构配置方案对配置耗能梁的高强度钢框架结构的抗震性能和损伤控制效应的影响。最后,提出了耗能梁削弱收益-损失评估的多性能指标。

1 设计概念

配置耗能梁的高强度钢框架结构体系的设计概念如图 1 所示^[11]。主体结构为高强度钢框架,在其周边布置屈服点低、延性高的耗能梁以形成“耗能跨”。耗能梁相对于主体结构的高强度钢梁具有更大的刚度和更低的强度,在地震作用下先行屈服并耗散能量,同时主体结构保持弹性;当结构发展更大变形后,主体结构发生屈服。结构体系在地震作用下将呈现如图 2 所示的“弹性-损伤控制-损伤超越”三阶段特征。耗能梁先于高强度钢框架发生屈服的程度可由屈服时序系数 ξ 量化,定义

$$\xi = \frac{\delta_{y2}}{\delta_{y1}} \quad (1)$$

式中: δ_{y1} 为耗能梁发生屈服时的结构变形; δ_{y2} 为主体结构发生屈服时的结构变形。

低残余变形同样是配置耗能梁的高强度钢框架结构体系的重要特征:该结构体系在损伤控制阶段中具有显著的屈服后刚度比,有利于降低震后残余变形^[14]。此外,当耗能梁与主体结构的屈服强度差足够大时,结构体系能够利用耗能梁的反向屈服实现部分自复位,有效地降低残余变形^[11]。

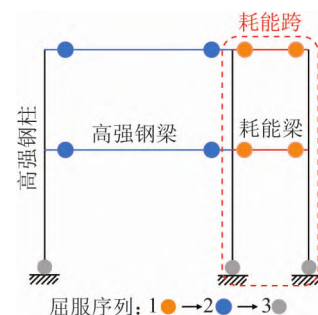


图 1 结构体系的设计概念

Fig. 1 Design concept of the structural system

2 算例结构

2.1 结构设计与模型验证

基于 KE 等^[15]提出损伤控制设计方法,设计了 3 层及 9 层算例结构,其结构布置如图 3 所示。假定结构中梁、柱构件均已采取有效措施以保证其整体稳定性。楼面恒荷载和活荷载分别为 $4.8 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $2 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ 。3 层和 9 层结构的自振周期分别为 0.64 s 和 1.91 s。

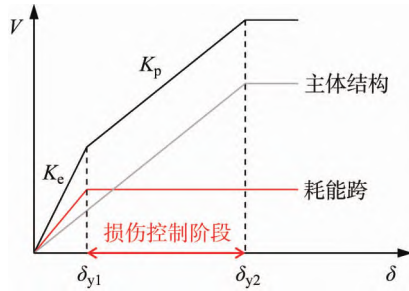


图 2 结构体系的三阶段特性

Fig. 2 Three-stage characteristic of the structural system

本文采用结构分析软件 SAP2000 [16] 建立 3 层及 9 层算例结构的“塑性铰-梁单元”数值模型,其中结构构件的非线性特性由离散的 0 长度刚塑性塑性铰和弹性梁单元进行模拟。结构构件的弯矩-转角关系依据 ASCE 41-13 规范 [17] 定义了对应塑性发展至强度降低的转角限值 δ_d ,当耗能梁塑性铰的转角 δ 超过损伤限值 δ_d 时,可以判定耗能梁产生损伤,如图 4 所示。需要说明的是,结构构件在损伤点后的强度降低路径依据 ASCE 41-13 规范 [17] 的建议进行了调整,将强度降低段的刚度统一为 -0.1 倍的弹性刚度以减少数值收敛问题。

为验证该建模方法的合理性,对陈以一等 [11] 研究中 大比例空间钢框架的拟静力往复加载试验进行了建模、分析。图 5 对比了试验和模拟结构的层间剪力-层间位移角曲线,可见两者吻合良好。

2.2 基于耗能梁削弱的结构配置方案

通过对 3 层及 9 层算例结构数值模型中耗能梁的塑性铰的屈服弯矩和屈服转角进行调整,可以理想地模拟针对耗能梁的抗弯承载力的削弱。定义强度削弱比 R 为:

$$R = \frac{\Delta M}{M_0} \quad (2)$$

式中: ΔM 为耗能梁抗弯承载力的削弱量; M_0 为未削弱的耗能梁抗弯承载力。

本文选取 R 分别为 0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 这 5 个耗能梁削弱等级对 3 层及 9 层算例结构数值模型中所有耗能梁进行削弱,对应了耗能梁抗弯承载力从 20% 到 60% 的降低,得到包括原始结构(记为 $R=0$)在内共六种耗能梁配置方案,12 个算例结构。需要说明的是,耗能梁的损伤限值 δ_d 同样依据对应屈服转角等比调整以反映耗能梁削弱后损伤的加剧程度。

3 分析结果

3.1 非线性静力分析

本文采用对应于结构一阶振型的侧向力分布模式并考虑重力二阶效应,对所有的算例结构进行了非线性静

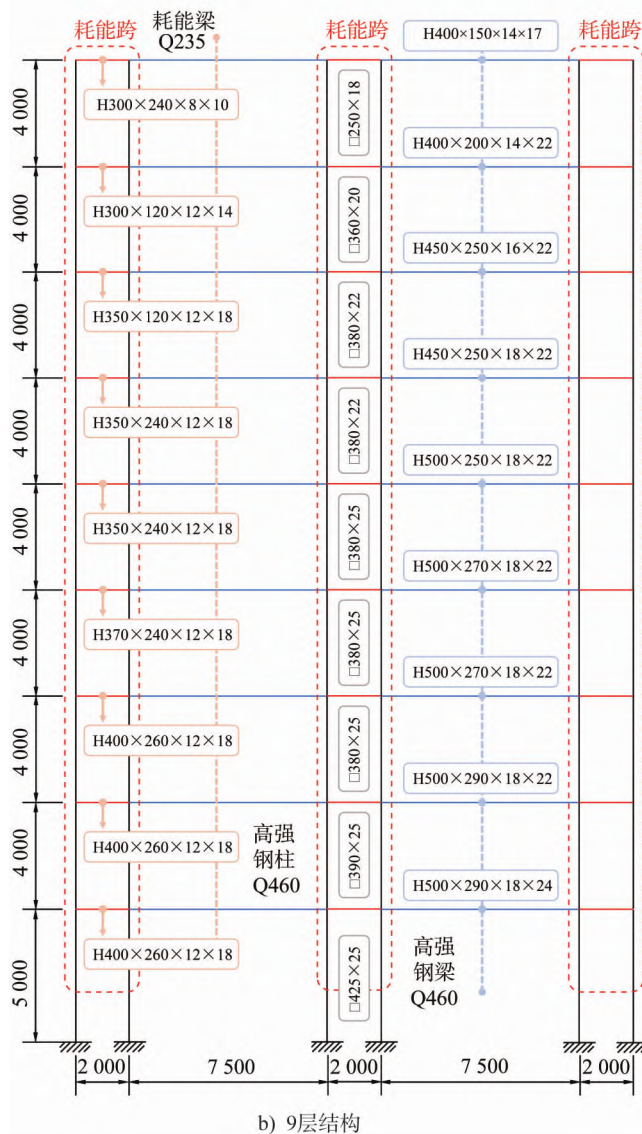
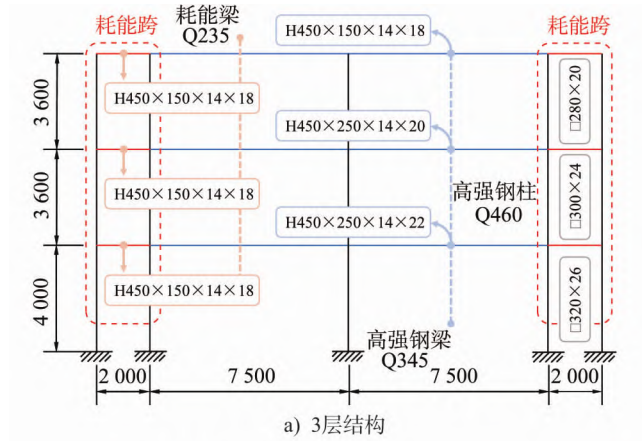


图 3 结构布置(单位:mm)

Fig. 3 Structural layout (Unit:mm)

力分析,推覆曲线如图 6 所示,其中 V 为基底反力, θ 为屋顶层位移角(屋顶位移与结构高度之比)。结果显示,所有的推覆曲线均呈现出显著的“弹性-损伤控制-损伤超越”三阶段特征,表明所有的算例结构均能够实现设计所预

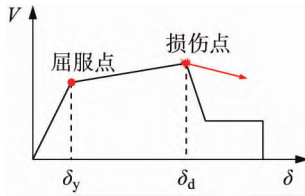


图 4 结构构件的力-变形关系

Fig. 4 Force-deformation relationship for structural components

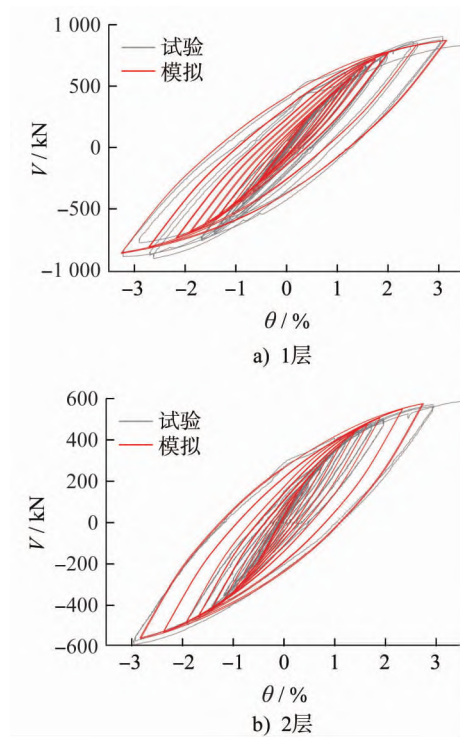


图 5 层间剪力-层间位移角 (V-θ) 试验和模拟结果对比
Fig. 5 Comparison of the inter-story shear force vs inter-story drift between test result and simulation result

期的损伤控制效应和破坏模式。

对推覆曲线进行三折线理想化处理,得到屈服时序系数 ξ 。随着强度削弱比 R 的增大,屈服时序系数 ξ 逐渐增大。3 层结构对应 R (0、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6) 的 ξ 分别为 2.6、3.1、3.6、4.1、5.3、6.8;9 层结构的 ξ 分别为 2.4、3.2、3.8、4.6、5.8、7.7。定义屈服时序系数增幅 r_z 为:

$$r_z = \frac{\xi_R - \xi_0}{\xi_0} \quad (3)$$

式中: ξ_R 为不同削弱等级下结构的屈服时序系数; ξ_0 为原始结构的屈服时序系数。

从图 7 可以看出,屈服时序系数增幅 r_z 呈现加速增长的趋势,高于对应的强度削弱比 R 。此外在同一削弱等级下,9 层结构的 r_z 要显著大于 3 层结构的 r_z 。结果表明,耗能梁削弱将有效增大结构的屈服时序系数 ξ 。

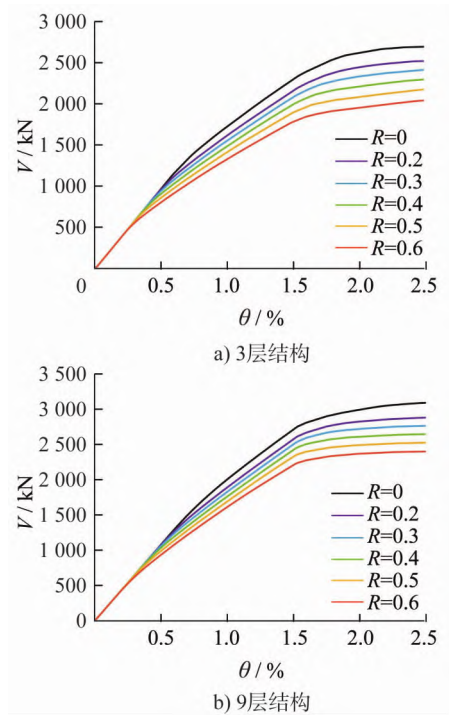


图 6 推覆曲线

Fig. 6 Pushover curves

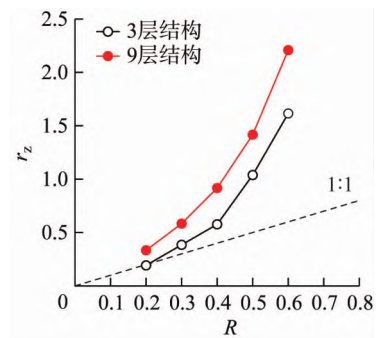


图 7 ξ 的增幅

Fig. 7 Amplification of ξ

3.2 地震时程分析

本文选取了 SAC 项目中提供的 20 条地震动记录 (LA01-20,50 年内超越概率为 10%,代表洛杉矶地区,硬土地) [18],其地震动反应谱如图 8 所示。需要说明的是,LA01-20 在原地震动记录后增加 30 s 的 0 激励段以消除震后自由振动对结构的残余响应的影响。地震时程分析采用瑞利阻尼,第 1 阶和第 2 阶模态的阻尼比均取 0.05。

3.2.1 最大层间位移角和残余层间位移角

图 9 所示为 3 层及 9 层算例结构在 LA01-20 地震作用下的平均最大层间位移角 θ_m 和平均残余层间位移角 θ_r ,其在一定程度上反映了结构的安全性能和震后可恢复性能。随着强度削弱比 R 的增大,对于平均最大层间位

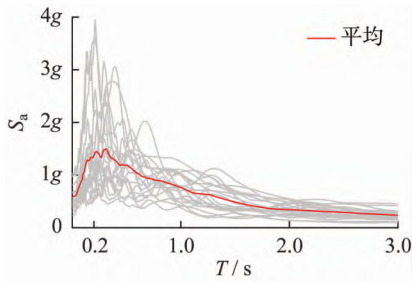


图 8 地震动反应谱

Fig. 8 Response spectra of ground motions

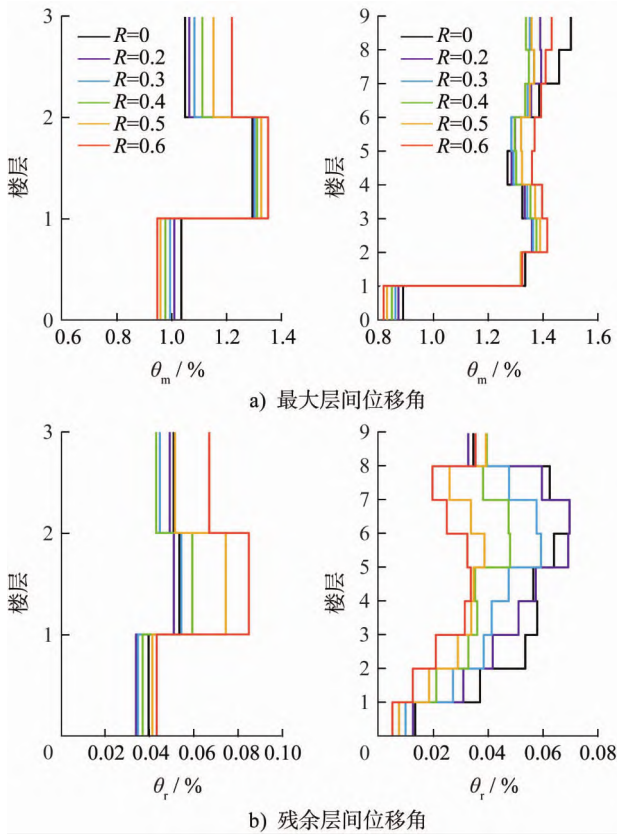


图 9 结构的抗震性能

Fig. 9 Seismic behavior of structure

移角 θ_m , 3 层结构的底层响应逐渐降低, 2 层和顶层响应加速增长; 所有楼层中最大响应出现在 2 层, 其在 $R=0.6$ 时相对原始结构的最大增幅仅为 4.5%。相比之下, 9 层结构的底层和 2 层响应逐渐降低, 中部 3~6 层响应加速增长, 上部 7 层至顶层响应首先降低, 在 R 增至 0.4 后转而增长; 所有楼层中最大响应出现在顶层, 其在 $R=0.4$ 时相对原始结构的最大降幅达 10.7%, 在 $R=0.6$ 时的降幅为 4.8%。

对于平均残余层间位移角 θ_r , 3 层结构的楼层响应首先呈现出不同程度的降低, 在 R 增至 0.4 后转而大幅增长; 所有楼层的平均响应在 $R=0.4$ 时相对原始结构降低 3.9%, 在 $R=0.5$ 和 $R=0.6$ 时分别增长 14.8% 和

32.8%。相比之下, 9 层结构除顶层外所有其他楼层的响应均以较大幅度逐渐降低; 所有楼层的平均响应在 $R=0.6$ 时相对原始结构降低 50.1%。结果表明, 耗能梁削弱对 3 层及 9 层算例结构在地震作用下的峰值变形影响相对有限, 而对残余变形影响显著。

3.2.2 主体结构的塑性发展和耗能梁的损伤发展

为了研究不同削弱等级下主体结构的塑性发展和耗能梁的损伤发展, 本文对 3 层及 9 层算例结构在地震作用下的主体结构塑性铰中超越图 4 屈服点的数目 $N_{HSS-MRF}$ 和耗能梁塑性铰中超越图 4 损伤点的数目 N_{EDB} 进行统计。定义主体结构的平均塑性发展率 r_h 和耗能梁的平均损伤发展率 r_e 为:

$$r_h = \frac{N_{HSS-MRF}}{N_{H-all}} \times 100\% \quad (4)$$

$$r_e = \frac{N_{EDB}}{N_{E-all}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: N_{H-all} 为主体结构塑性铰的总数; N_{E-all} 为耗能梁塑性铰的总数。

随着强度削弱比 R 的增大, 大体上主体结构的平均塑性发展率 r_h 维持在较低水准, 而耗能梁的平均损伤发展率 r_e 呈现出显著的加速增长趋势, 表明算例结构在 LA01-20 地震作用下能够实现设计所预期的损伤控制效应和破坏模式。

结构 3 层和 9 层的 r_h 均呈现出先降低后增长的趋势。由于 3 层结构的地震需求显著大于 9 层结构 (其 LA01-20 地震作用下的平均加速度反应谱值分别为 0.98g 和 0.35g), 9 层结构的 r_h 相对较小, 但在 R 从 0.5 增至 0.6 时陡增并接近 3 层结构。如图 10 所示。

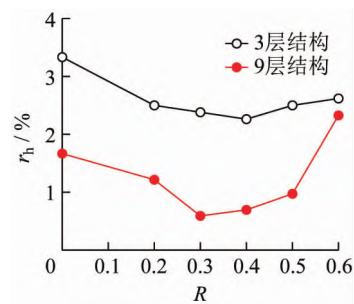


图 10 主体结构的 r_h

Fig. 10 r_h of the main structure

结构 3 层和 9 层的 r_e 均呈现出显著的加速增长趋势。3 层原始结构的耗能梁未经削弱即出现损伤, 9 层结构在 R 增至 0.3 前未出现损伤, r_e 在 R 增至 0.5 前相对较小。随后 3 层和 9 层结构的 r_e 陡增, 9 层结构的 r_e 超过 3 层结构。 r_e 的陡增反映了耗能梁的损伤发展加剧, 过多的耗能梁超越其损伤发展阈值并向主体结构卸载导致了 r_h 转而增长, 其中 9 层结构的 r_h 在 R 从 0.5 增至

0.6 时增长尤为明显。如图 11 所示。

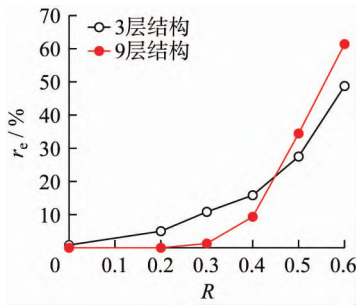


图 11 耗能梁的 r_e
Fig. 11 r_e of the EDB

结果表明,耗能梁的适度削弱将促进结构体系中损伤控制效应的发挥,降低了 3 层及 9 层算例结构在地震作用下的主体结构的塑性发展程度,但过度削弱将加剧耗能梁的损伤发展以至于主体结构的塑性发展程度转而增长。

3.3 耗能梁削弱的收益-损失评估

配置耗能梁的高强钢框架结构设计中基于耗能梁削弱的结构配置方案对结构的抗震性能和损伤控制效应的影响是多方面的,耗能梁削弱需要基于多性能指标进行收益-损失评估。以 LA01-20 地震作用下的 3 层及 9 层算例结构为例:

1) 结构的安全性是耗能梁削弱的前提。分析结果已表明,耗能梁削弱对 3 层及 9 层算例结构在地震作用下的峰值变形影响相对有限。可以认为,耗能梁削弱未显著降低 3 层及 9 层算例结构在 LA01-20 地震作用下的安全性,但是耗能梁削弱对配置耗能梁的高强钢框架结构在罕遇地震下的极限状态、破坏模式以及实现震后可恢复目标的可能性仍有待进一步研究。

2) 残余变形是评价结构震后可恢复性的重要宏观指标。定义耗能梁削弱在降低残余变形方面产生的收益指标 G_r 为:

$$G_r = \frac{\bar{\theta}_{r-0} - \bar{\theta}_{r-R}}{\bar{\theta}_{r-0}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: $\bar{\theta}_{r-R}$ 为不同削弱等级下结构中所有楼层的平均残余变形; $\bar{\theta}_{r-0}$ 为原始结构中所有楼层的平均残余变形。

3) 增大屈服时序系数 ξ 以促进耗能梁集中损伤、主体结构避免损伤的损伤控制效应是耗能梁削弱的主要目标。定义耗能梁削弱在降低主体结构的塑性发展程度方面产生的收益指标 G_h 为:

$$G_h = \frac{r_{h-0} - r_{h-R}}{r_{h-0}} \times 100\% \quad (7)$$

式中: r_{h-R} 为不同削弱等级下结构中主体结构的塑性发展程度; r_{h-0} 为原始结构中主体结构的塑性发展程度。同样,定义耗能梁削弱在增大耗能梁的损伤发展程度方面产生

的损失指标 L_e 为:

$$L_e = r_{e-R} - r_{e-0} \quad (8)$$

式中: r_{e-R} 为不同削弱等级下结构中耗能梁的损伤发展程度; r_{e-0} 为原始结构中耗能梁的损伤发展程度。

基于此,绘出 3 层及 9 层算例结构的耗能梁削弱的收益和损失-强度削弱比 R 曲线,如图 12 所示。需要说明的是,负收益相当于损失。3 层结构的收益指标 G_r 和 G_h 分别在 R 增至 0.3 和 0.4 后出现降低,损伤指标 L_e 已分别达到 10% 和 15%,选取 3 层结构的耗能梁建议削弱等级为 $R = 0.3$ 。9 层结构的收益指标 G_r 始终保持增长,但 G_h 在 R 增至 0.3 后即出现降低,在 $R = 0.6$ 时陡降乃至产生损失,表明单一的残余变形指标无法准确反映配置耗能梁的高强钢框架结构的震后可恢复性。结合损伤指标 L_e 在 R 增至 0.4 后陡增,选取 9 层结构的耗能梁建议削弱等级为 $R = 0.4$ 。以上对耗能梁削弱等级的建议仅建立在针对性能指标变化趋势的独立分析之上,没有将多性能指标定量地进行关联以提出综合评估指标。因此配置耗能梁的高强钢框架结构的可恢复性评估流程仍有待进一步完善。

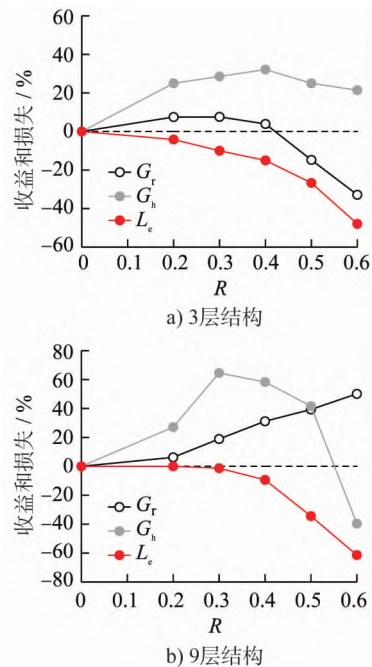


图 12 耗能梁削弱的收益和损失
Fig. 12 Gains and losses of the EDB reduction

4 结论

本文建立并验证了配置耗能梁的高强钢框架结构的“塑性铰-梁单元”数值模型,通过配置不同削弱等级的耗能梁得到了具有不同屈服时序系数的 3 层及 9 层算例结构,并进行了非线性静力分析和地震时程分析。可以得出以下主要结论:

- (1) 耗能梁削弱能够有效地增大屈服时序系数,其对

3 层及 9 层算例结构在地震作用下的峰值变形影响相对有限,而对震后残余变形影响显著。

(2) 耗能梁的适度削弱将促进结构体系中损伤控制效应的发挥,降低了 3 层及 9 层算例结构在地震作用下的主体结构的塑性发展程度,但过度削弱将加剧耗能梁的损伤发展以至于主体结构的塑性发展程度转而增长。

(3) 提出了耗能梁削弱收益-损失评估的多性能指标,并针对 3 层及 9 层算例结构的耗能梁削弱等级提出了建议。

参考文献:

- [1] 吕西林,陈云,毛苑君. 结构抗震设计的新概念——可恢复功能结构[J]. 同济大学学报(自然科学版),2011,39(7):941-948. DOI:10.3969/j.issn.0253-374x.2011.07.001.
LYU Xilin, CHEN Yun, MAO Yuanjun. New concept of structural seismic design: earthquake resilient structures[J]. Journal of Tongji University(Natural Science),2011,39(7):941-948. DOI:10.3969/j.issn.0253-374x.2011.07.001. (in Chinese)
- [2] GUNAY S, MOSALAM K M. PEER performance-based earthquake engineering methodology, revisited[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2013, 17(6): 829-858. DOI: 10.1080/13632469.2013.787377.
- [3] BRUNEAU M, CHANG S E, EGUCHI R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities[J]. Earthquake Spectra, 2003, 19(4):733-752. DOI:10.1193/1.1623497.
- [4] 翟长海,刘文,谢礼立. 城市抗震韧性评估研究进展[J]. 建筑结构学报,2018,39(9):1-9. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2018.09.001.
ZHAI Changhai, LIU Wen, XIE Lili. Progress of research on city seismic resilience evaluation[J]. Journal of Building Structures,2018,39(9):1-9. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2018.09.001. (in Chinese)
- [5] 陈以一,贺修樟,柯珂,等. 可更换损伤元结构的特征与关键技术[J]. 建筑结构学报,2016,37(2):5-14. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2016.02.001.
CHEN Yiyi, HE Xiuzhang, KE Ke, et al. Characteristics and technical issues on structural systems with replaceable damage-concentrated elements [J]. Journal of Building Structures,2016,37(2):5-14. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2016.02.001. (in Chinese)
- [6] MCCORMICK J, ABURANO H, IKENAGA M. Permissible residual deformation levels for building structures considering both safety and human elements[C]//Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing: [s. n.],2008.
- [7] CONNOR J J, WADA A, IWATA M, et al. Damage-controlled structures. I: preliminary design methodology for seismically active regions [J]. Journal of Structural Engineering,1997,123(4):423-431. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:4(423).
- [8] VARGAS R, BRUNEAU M. Analytical response and design of buildings with metallic structural fuses. I[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(4): 386-393. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2009)135:4(386).
- [9] VARGAS R, BRUNEAU M. Experimental response of buildings designed with metallic structural fuses. II [J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(4): 394-403. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9445(2009)135:4(394).
- [10] 李国强,王彦博,陈素文,等. 高强度结构钢研究现状及其在抗震设防区应用问题[J]. 建筑结构学报,2013,34(1):1-13. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2013.01.003.
LI Guoqiang, WANG Yanbo, CHEN Suwen, et al. State-of-the-art on research of high strength structural steels and key issues of using high strength steels in seismic structures[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(1): 1-13. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2013.01.003. (in Chinese)
- [11] 陈以一,柯珂,贺修樟,等. 配置耗能梁的复合高强钢框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2015,36(11):1-9. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2015.11.001.
CHEN Yiyi, KE Ke, HE Xiuzhang, et al. Experimental study on seismic performance of high strength moment resisting frames with energy dissipation beams[J]. Journal of Building Structures,2015,36(11):1-9. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2015.11.001. (in Chinese)
- [12] KE K, ZHAO Q Y, YAM M C H, et al. Energy factors of trilinear SDOF systems representing damage-control buildings with energy dissipation fuses subjected to near-fault earthquakes[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2018, 107:20-34. DOI:10.1016/j.soildyn.2017.12.023.
- [13] KE K, WANG W, YAM M C H, et al. Residual displacement ratio demand of oscillators representing HSSF-EDBs subjected to near-fault earthquake ground motions [J]. Engineering Structures, 2019, 191: 598-610. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.04.054.
- [14] KAWASHIMA K, MACRAE G A, HOSHIKUMA J I, et al. Residual displacement response spectrum [J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(5): 523-530. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1998)124:5(523).
- [15] KE K, YAM M C H. A performance-based damage-control design procedure of hybrid steel MRFs with EDBs [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 143: 46-61. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.12.011.
- [16] Computers and Structures Inc. SAP2000, structural software for analysis and design[M]. Walnut Creek: Computers and Structures Inc.
- [17] American Society of Civil Engineers. Seismic Rehabilitation of Existing Buildings: ASCE/SEI 41-13[S]. Reston: American Society of Civil Engineers,2014.
- [18] SHOME N, CORNELL C A, BAZZURRO P, et al. Earthquakes, records, and nonlinear responses[J]. Earthquake Spectra, 1998, 14(3): 469-500. DOI: 10.1193/1.1586011.